

文章编号: 1000-0747(2015)01-0111-06 DOI: 10.11698/PED.2015.01.15

游梁式抽油机井井下泵功图测试方法

贾德利^{1,2}, 刘合¹, 裴晓含¹, 王国庆³, 杨清海¹, 王尧²

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 哈尔滨理工大学; 3. 大庆油田采油工程研究院)

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目“采油井筒控制工程关键技术与装备”(2012AA061300)

摘要: 提出了一种利用加速度传感器测量抽油泵冲程从而得到游梁式抽油机井井下泵功图的直接测试方法, 并进行了实验验证和现场测试。分析了加速度传感器输出的带有冲击干扰的低频弱信号的特性, 对周期信号及其漂移进行了建模分析, 得出了长时间积分累积误差及其对测量结果的影响。根据消去原理设计了隔直去噪滤波器, 建立了其数学模型, 通过隔直去噪滤波器可将漂移分量从采集信号中分离出来。实验验证及现场测试结果表明: 原始加速度数据经隔直去噪滤波器滤波和二次积分后能够得到无漂移位移信号, 从而得出井下泵功图, 数据测量精度在 $\pm 2.0\%$ 以内, 且测量误差随着冲次增大而减小; 提出的井下泵功图测试方法可实现对泵效的计算和冲程损失直接测量, 为游梁式抽油机工艺分析提供依据。图 15 表 1 参 12

关键词: 抽油机; 井下泵功图; 冲程; 加速度; 滤波器

中图分类号: TE355.5

文献标识码: A

Test approach of downhole pump diagram for beam bumping wells

Jia Deli^{1,2}, Liu He¹, Pei Xiaohan¹, Wang Guoqing³, Yang Qinghai¹, Wang Yao²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. Research Institute of Production Engineering, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing 163453, China)

Abstract: A direct test approach of downhole pump diagram for beam bumping wells was presented using acceleration transducer to measure the pump stroke, and it was verified through laboratory experiments and field tests. The feature of the low-frequency and weak signal exported from the acceleration transducer with impact interference was analyzed. The periodic signal and its drift were modeled to work out the accumulative error of long-term integration and its influence on measurement results. Based on elimination principles, the DC-blocking and denoising filter was designed and its mathematical model was established. Through the filter, the drift component can be separated from the acquired signal. The laboratory experiments and field tests indicate that, the displacement signal without drift can be obtained from the initial acceleration data through filtering and quadratic integral, thus the downhole pump diagram can be obtained; the data measurement error is within $\pm 2.0\%$, which will be further reduced with the increase of stroke times; the test approach of downhole pump diagram can realize the calculation of pump effectiveness and the direct measurement of stroke loss, thereby providing criteria for the process analysis of beam bumping well.

Key words: pump unit; downhole pump diagram; stroke; acceleration; filter

0 引言

游梁式抽油机井井下泵功图能够直接反映抽油泵工况, 是油井故障分析、举升工艺参数优化的重要依据。现有的井下泵功图都是在地面光杆处进行测试, 获取光杆示功图(也称悬点示功图或地面示功图)^[1], 再根据抽油杆弹性数学模型计算得出, 间接反映抽油泵工况^[2]。然而, 由于抽油杆和油管间存在强烈库仑摩擦, 是 1 个机电液耦合的复杂非线性过程^[3-6], 加上井下工况的复杂性和不可预见性, 很难建立准确的数学模型, 导致基于数学模型的地面间接测试结果与真实

泵况之间存在误差, 得出的是近似泵功图。因此, 本文提出新的游梁式抽油机井井下功图测试方法, 利用 MEMS(微机电系统)传感器测量抽油泵上端的加速度, 再通过二次积分计算出抽油泵冲程, 从而准确判断抽油泵工况。

近年来, MEMS 传感器技术不断发展和完善, 但依然存在随机噪声、直流分量干扰等问题^[7]。为了去除 MEMS 传感器的随机漂移噪声, 相关研究者提出了卡尔曼滤波法、消去法等诸多解决办法^[8-10], 但这些方法主要应用于对测量精度要求不高或有辅助技术补偿的情况^[11-12], 不适用于井下泵功图测试这种具有较高精

度要求的情况。利用加速度传感器测量游梁式抽油机井井下抽油泵冲程时,采集到的为低频弱信号,频率最低只有 0.05 Hz。此外,抽油杆和油管间的库仑摩擦导致干扰信号强,属于高频冲击干扰,干扰强度最高可达到真实信号峰值的几十倍。实际测试可知,传感器的漂移随强冲击而随机改变,由于在采集信号时必须使用超低带宽的硬件滤波器,滤波器中电容充放电的不对称特性会导致信号在强冲击下失真更加严重。本文对这种受到强冲击干扰且漂移量被影响的低频弱信号进行系统分析和建模,并根据消去原理设计 1 种隔直去漂滤波器。利用这种滤波器可以隔离信号中的漂移量,长时间积分时无漂移累计,使得信号经二次积分之后能够计算出准确的抽油泵冲程,从而实现抽油泵上端的功图测量。

1 数值分析及滤波器设计

1.1 数值分析

通过对加速度传感器输出值进行二次积分计算出泵位移(冲程),假设实际采集到的初始离散信号为:

$$X = R + A \quad (1)$$

导致信号漂移及噪声的因素很多,除了白噪声之外,还包括传感器制造误差产生的漂移、积分器等电路造成的信号失真、抽油杆摩擦导致的横向振动信号、设备安装角度不精准造成的误差等,既有随机误差,也有系统误差。不同的系统干扰不同,但都存在较小的直流分量或者周期较长的随机扰动,理论上可以控制在非常小的量级。

通常使用 AR 模型(自回归模型)对 A 进行建模,典型的 p 阶 AR 模型为:

$$a_i = c + \sum_{j=1}^p \phi_j a_{i-j} + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

对于 1 个周期内已经采集到的数据,(2)式可简化为:

$$a_i = c + d_i + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

(1)式可表达为:

$$X = R + C + D + E \quad (4)$$

通常情况下, E 的周期远小于 R 的周期,且其元素均值为零; D 远小于 R 的有效值,且其周期不等于 R 的周期或没有周期性。

由(4)式可得:

$$x_i = r_i + c + d_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

对 X 进行积分运算可得:

$$\sum_{i=1}^n x_i \Delta t = \sum_{i=1}^n r_i \Delta t + \sum_{i=1}^n d_i \Delta t + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Delta t + nc \Delta t \quad (6)$$

(6)式中, $\sum_{i=1}^n r_i \Delta t$ 收敛, $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Delta t$ 可近似为零。而

$\sum_{i=1}^n d_i \Delta t + nc \Delta t$ 是发散的,随着积分时间的延长,即 n 的增大,该项将逐渐累计并湮没被测信号的积分,因此需要设计 1 种隔直去噪滤波器去除该项的影响。

1.2 隔直去噪滤波器设计

隔直去噪滤波即分离采集信号中的漂移分量,其原理如图 1 所示,去掉采集信号 X 中的漂移分量 A 即得到滤波器的输出信号 Y 。



图 1 隔直去噪滤波器原理

假设:

$$a_i = \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} x_k}{l_{TR}} \quad (k=n, n+1, \dots, n+l_{TR}-1) \quad (7)$$

实际上,(7)式的本质为对 X 进行均值滤波。由于滤波窗口长度为 R 的每周期采样点数,因此 A 和 X 不等长,设 X 的长度为 l_X ,则 A 的长度为 $l_A = l_X - l_{TR}$ 。相对于序列 X , A 产生了 $T_R/2$ 的延时,调整序列对应关系,可得:

$$y_i = x_q - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} x_k}{l_{TR}} \quad (8)$$

其中

$$q = i + \frac{l_{TR}}{2}$$

(8)式即隔直去噪滤波器数学模型。结合(5)式和(8)式,即滤波器 i 时刻的输出为延时半周期后 x_q 值减去 k 周期内的均值,得:

$$y_i = r_q + d_q + \varepsilon_q + c - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} (r_k + d_k + \varepsilon_k + c)}{l_{TR}} \quad (9)$$

(9)式经过常数项消减后整理可得:

$$y_i = r_q + d_q + \varepsilon_q - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} r_k}{l_{TR}} - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} d_k}{l_{TR}} - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} \varepsilon_k}{l_{TR}} \quad (10)$$

显然 $\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} r_k = 0$, 由于 E 的周期远小于 R 的周期,

因此认为 $\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} \varepsilon_k = 0$, 则(10)式可简化为:

$$y_i = r_q + d_q + \varepsilon_q - \frac{\sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} d_k}{l_{TR}} \quad (11)$$

对 Y 进行积分，得到：

$$\sum_{i=1}^n y_i \Delta t = \left(\sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} r_q + \sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} \varepsilon_q + \sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} d_q - \frac{1}{l_{TR}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} d_k \right) \Delta t \quad (12)$$

(12) 式中，同样认为 $\sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} \varepsilon_q = 0$ ，此外：

$$\sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} d_q - \frac{1}{l_{TR}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=i}^{i+l_{TR}-1} d_k = \frac{1}{l_{TR}} \left(\sum_{f=1}^{\frac{l_{TR}}{2}-1} \sum_{e=f}^{\frac{l_{TR}}{2}-1} d_e + \sum_{s=n}^{\frac{l_{TR}}{2}} \sum_{h=s}^{\frac{l_{TR}}{2}} d_h \right) \quad (13)$$

令：

$$E_r = \frac{1}{l_{TR}} \left(\sum_{f=1}^{\frac{l_{TR}}{2}-1} \sum_{e=f}^{\frac{l_{TR}}{2}-1} d_e + \sum_{s=n}^{\frac{l_{TR}}{2}} \sum_{h=s}^{\frac{l_{TR}}{2}} d_h \right) \quad (14)$$

则 (12) 式可表达为：

$$\sum_{i=1}^n y_i \Delta t = \sum_{q=1+\frac{l_{TR}}{2}}^{\frac{l_{TR}}{2}} r_q \Delta t + E_r \Delta t \quad (15)$$

(15) 式中，误差项 E_r 不会随积分时间的延长而增大，因此其值始终保持在 1 个很小的范围内，即对 Y 的积分等同于对 R 的积分，一般情况下 n 大于等于 l_{TR} ，从而实现了长时间积分累计误差的消除。

2 实验验证及现场测试

为了测量抽油机井井下泵功图，研制了 1 种井下存储式示功仪（见图 2）。该示功仪实现了载荷测量以及环境压力、温度对载荷的修正补偿，其 MEMS 加速度传感器测量范围为 $\pm 1.7g$ ，既可测量静态加速度，也可测量动态加速度，灵敏度为 $1000/g$ ；在 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 内，温度灵敏性为 $\pm 0.3\%$ ，零点偏移精度为 $\pm 0.025g$ 。

该示功仪采用本文设计的隔直去噪滤波器对游梁式抽油机井抽油泵功图进行测试，抽油泵标称冲程为 2.7 m ，冲次为 $6.94\text{ 次}/\text{min}$ ，即每冲程耗时 8.65 s 。图 3 为数据处理过程，需要经过两次隔直去噪滤波处理。

图 4 为采集到的加速度原始数据，其波形和一般周期信号相似，采样频率为 200 Hz 。对加速度进行长时间积分，即可得到速度信号（见图 5）。由于原始信

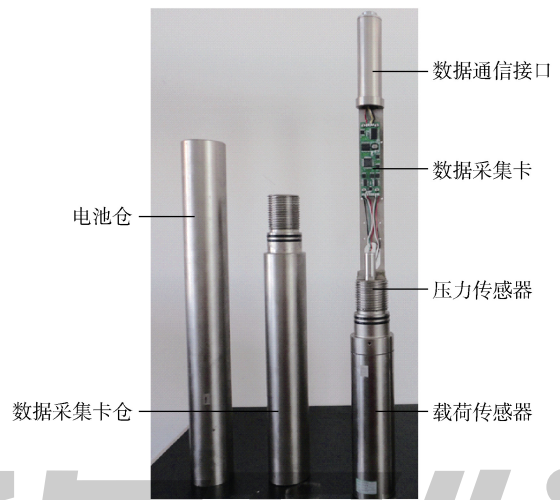


图 2 井下存储式示功仪实物

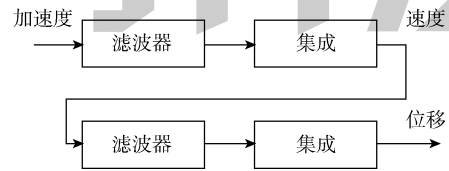


图 3 数据处理过程

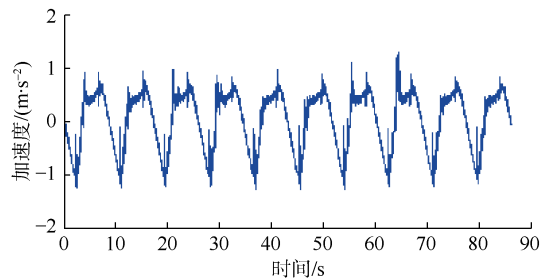


图 4 加速度原始数据

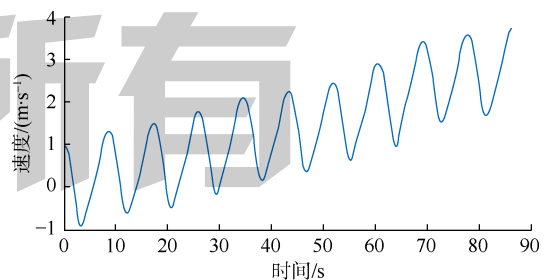


图 5 积分后速度曲线

号中存在微弱的直流信号，使得积分后产生了严重的整体漂移，且为随机漂移（图 5 为向上漂移）。对漂移后的速度数据再进行 1 次积分，即可求得位移值（见图 6），其波形有一定的周期性，但漂移非常严重。

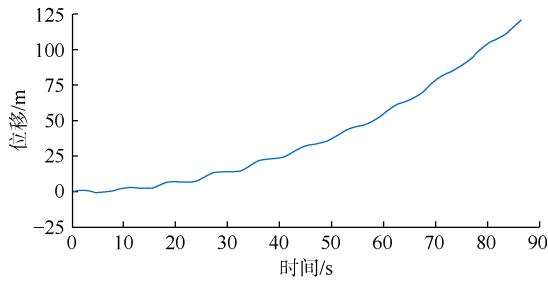


图6 二次积分后位移曲线

利用本文提出的隔直去噪滤波器对上述原始加速度数据重新进行处理。根据实验对象可知,隔直去噪滤波器的参数 l_{TR} 应设置为采样频率和周期的乘积,即 $200 \times 8.65 = 1730$ 。图7为滤波后加速度信号中的漂移分量,可以看出:除存在直流分量外,波形具有明显阶梯,阶梯宽度与原始信号周期相近。滤波过程中信号 A 产生半个周期的延时,滤波后前后各损失半个周期的加速度数据(见图8),但并不影响工艺测试。对去掉漂移分量的加速度信号进行长时间积分运算,得到的速度信号(见图9)与图5相比已无漂移。

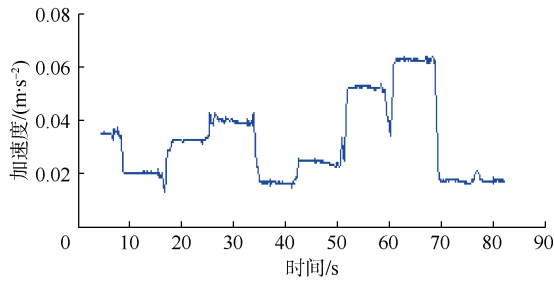


图7 加速度滤波误差值

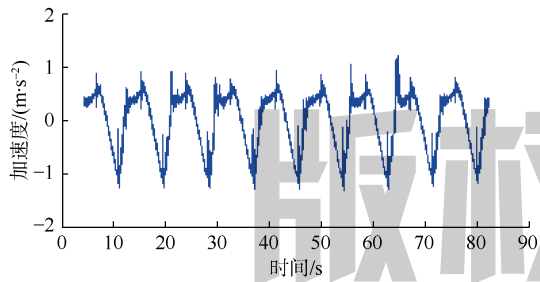


图8 滤波后加速度数据

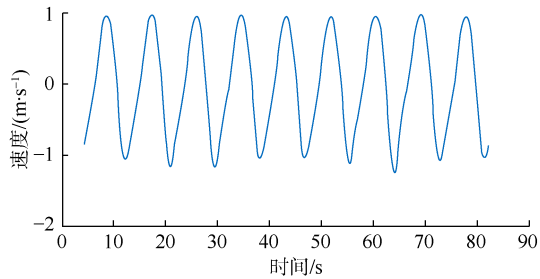


图9 滤波后速度曲线

对速度信号进行滤波处理,可得到速度信号中的漂移分量(见图10),同样表现出周期性和数据半周期损失。对滤波后速度数据(见图11)再进行积分,得到游梁式抽油机井井下泵位移曲线(见图12),较好地反映了泵运动规律。

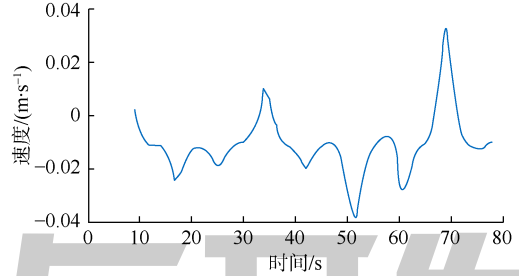


图10 速度滤波误差值

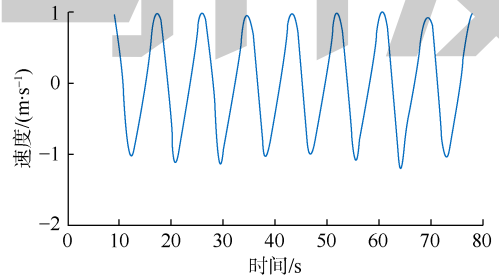


图11 二次滤波后速度曲线

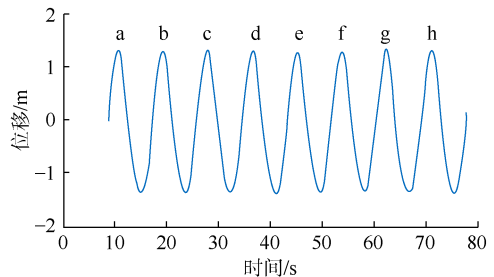


图12 滤波后位移曲线

对图12中数据进一步整理(见表1),可以看出,采用本文所设计滤波器,长时间的积分运算并没有带来误差的累计,若以标称冲程2.7m为依据,该组数据测量精度在 $\pm 2\%$ 以内。

表1 误差统计

峰编号	上峰值/m	下峰值/m	冲程/m	误差/m	测量精度/%
a	1.328	-1.388	2.716	0.016	0.59
b	1.334	-1.376	2.710	0.010	0.37
c	1.329	-1.378	2.707	0.007	0.26
d	1.323	-1.376	2.699	-0.001	-0.04
e	1.313	-1.368	2.681	-0.019	-0.70
f	1.298	-1.357	2.655	-0.045	-1.67
g	1.349	-1.363	2.712	0.012	0.44
h	1.320	-1.379	2.699	-0.001	-0.04

通过测量加速度对井下泵冲程进行测量时，冲次是比较重要的影响因素。为了验证本文方法对不同冲次的适应性，利用大庆油田采油工程研究院有杆泵举升模拟实验平台在相同冲程不同冲次下进行实验。设定1个小量冲程1.98 m（实验平台冲程测试精度为

$\pm 0.1\%$ ），冲次分别设定为3次/min、4次/min和6次/min。图13为整理后的实验数据，为验证本文方法对长时间积分运算带来累计误差的修正能力，取50个数据进行分析。由图13可知：随着冲次增大，周期缩短，误差呈收敛趋势，测量精度提高。

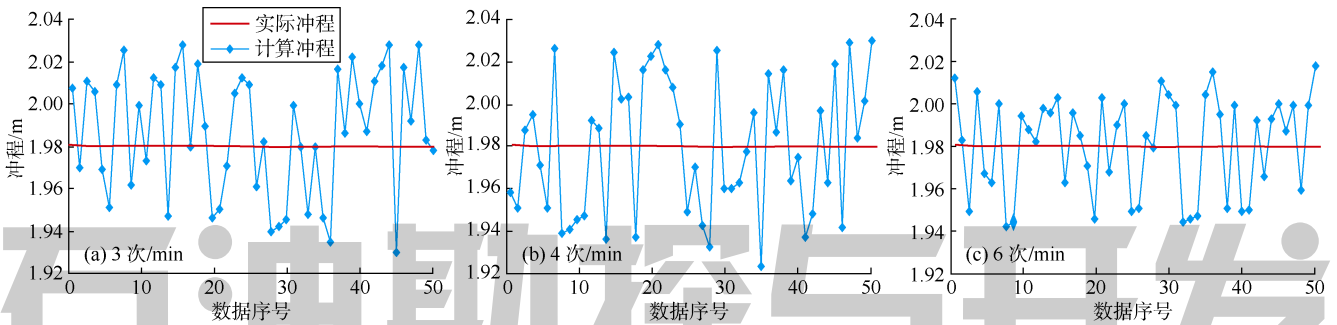


图13 3种冲次状态下冲程数据

对现场抽油机井井下泵功图进行测试，被测井泵冲程由2.0 m调整为2.8 m。被测井基本参数为：抽油机机型CYJ10-3-37HB，介质为水，不含气，泵挂1000 m，动液面320 m，冲次6次/min。为了验证仪器一致性，测试时在井下分别安装了两套相同精度的测试仪，测试仪设置为每间隔2 h 录取1次数据，1次录取的时间为5 min。测试到泵冲程由2.0 m增大到2.8 m，与实际调整吻合。图14为不同冲程泵功图，可以看出，随着冲程增大，泵载荷增加不大，但对泵功图进行积分再通过泵效率公式计算得出泵效率由66.0%增大到69.4%。

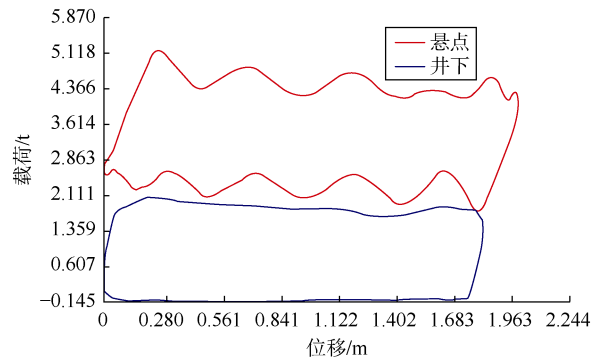


图15 悬点和井下泵功图对比

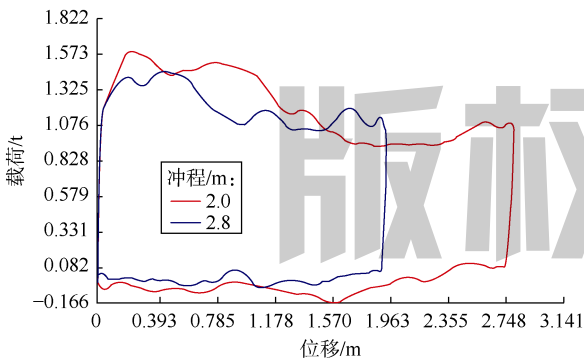


图14 不同冲程泵功图对比

图15为在上述测试条件下将悬点调整为2 m时悬点泵功图与井下泵功图的对比，可以看出，由于抽油杆的弹性变形，悬点与泵的冲程并不一致，计算抽油杆效率及设计工艺参数时需充分考虑抽油杆的弹性变形。

3 结论

利用加速度传感器可以直接测量抽油泵冲程，从而得到抽油泵功图，针对方法中存在的高频干扰和漂移等问题开展研究，分析了带有强冲击干扰的低频弱信号的特性，对周期信号及其漂移进行了建模分析，得出了长时间积分累计误差及其对测量结果的影响，并根据消去原理设计了隔直去噪滤波器，将漂移分量从采集信号中分离出来。实验结果表明：原始加速度数据经隔直去噪滤波器滤波并积分后能够得到速度信号；对速度信号再次滤波和积分后，得到了无漂移位移信号，长时间的积分运算没有造成误差累计，数据测量精度在 $\pm 2\%$ 以内，且测量误差随着冲次增大而减小。现场测试结果表明，应用本文提出的游梁式抽油机井井下泵功图测试方法可直接评判井下泵工况。

符号注释:

X ——实测信号序列即传感器采集值; R ——被测真实值序列; A ——整体误差序列; a_i —— A 的第 i 个值, m/s^2 ; c ——常数, m/s^2 ; ε_i ——白噪声误差序列的第 i 个值, m/s^2 ; φ ——模型参数; d_i ——漂移误差序列的第 i 个值, m/s^2 ; C ——常数序列; D ——漂移误差序列; E ——白噪声误差序列, 均值为零; x_i —— X 的第 i 个值, m/s^2 ; r_i —— R 的第 i 个值, m/s^2 ; Δt ——采样周期, s ; Y ——滤波器输出信号序列; l_A —— A 的长度, 个; l_{TR} —— R 的每周期采样点数(必须取偶数), 个; l_X —— X 的长度, 个; T_R ——真实信号周期, s ; y_i —— Y 的第 i 个值, m/s^2 ; n ——采样点数; E_r ——噪声积分误差; g ——重力加速度, $9.8 m/s^2$; i, j, k, q, e, f, s, h ——序号。

参考文献:

- [1] 周继德. 抽油机井的泵况判断和故障处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
Zhou Jide. The method of judging the state of beam pump and treating the trouble[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [2] 彭健, 徐志强, 周志权. 基于传感器技术的有杆抽油井示功仪的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1701-1705.
Peng Jian, Xu Zhiqiang, Zhou Zhiquan. Design of dynamometer based on sensor technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1701-1705.
- [3] 梁华, 李训铭. 基于物理意义的示功图凡尔开闭点精确提取[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 109-115.
Liang Hua, Li Xunming. Accurate extraction of valve opening and closing points based on the physical meaning of surface dynamometer card[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 109-115.
- [4] Nolen K B, Gibbs S G, Nabla C. Quantitative determination of rod pump leakage using dynamometer techniques[R]. SPE 18185, 1990.
- [5] Xu Peng, Xu Shijin, Yin Hongwei. Application of self-organizing competitive neural network in fault diagnosis of suck rod pumping system[J]. Petroleum Science and Engineering, 2007, 58: 43-48.

- [6] Miska S, Sharaki A, Rajtar J M. A simple model for computer aided optimization and design of sucker rod pumping systems[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1997, 17: 303-312.
- [7] 何鹏举, 冯亮. 加速度信号随机噪声及趋势项实时消除方法研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(14): 1701-1705.
He Pengju, Feng Liang. Study on the real-time elimination method of random noise and trend terms in acceleration signal[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(14): 1701-1705.
- [8] Pan Yue, Song Ping, Li Kejie, et al. A filtering method of gyroscope random drift for miniature unmanned helicopter[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology. Harbin: IEEE, 2011: 730-734.
- [9] Wu Xingming, Duan Li, Chen Weihai. A Kalman filter approach based on random drift data of fiber optic gyro[C]//Proceedings of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Beijing: IEEE, 2011: 1933-1937.
- [10] Chen Weicao, Gao Guowei, Wang Juan, et al. The study of the MEMS gyro zero drift signal based on the adaptive Kalman filter[J]. Key Engineering Materials, 2012, 500: 635-639.
- [11] Cao Dianguo, Liu Changchun, Wang Peng. Removing baseline drift in pulse waveforms by a wavelet adaptive filter[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai: iCBBE, 2008: 2135-2137.
- [12] Chen Y Y, Chang S J, Huang C Y, et al. An elimination design for drift rate effects of MEMS-based inertial devices[C]//Proceedings of the 3rd International Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference. Taipei: IEEE, 2008: 153-155.

第一作者简介: 贾德利(1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨理工大学教授, 主要从事自动化控制、电力电子、分层注水和井筒工程控制技术等方面的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院采油采气装备研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: jiadeli422@petrochina.com.cn

收稿日期: 2014-06-05 修回日期: 2014-12-23

(编辑 胡苇玮 绘图 刘方方)